

设计经验

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.14.011

舟山某海岛海水淡化国产化能量回收工程实践

杨树军^{1,2,3}, 黄浩鹏⁴, 汪程鹏^{1,2,3}, 李东洋^{1,2,3}, 刘浩^{1,2,3},
晏鹏^{1,2,3}

(1. 自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192; 2. 自然资源部海水淡化与膜材料重点实验室, 天津 300192; 3. 威海市海水综合利用产业技术研究中心, 山东威海 264201; 4. 天津市蓝十字膜技术有限公司, 天津 300192)

摘要: 为解决舟山某海岛淡水资源短缺问题,保障居民生活用水需求,建设了规模1 500 m³/d的海水淡化工程。采用“气浮+超滤+一级反渗透+二级反渗透+后矿化”双膜法处理工艺,配套国产化透平式能量回收系统及可编程逻辑控制器(PLC)+工控机自动控制系统。工程参考邻近海域海水水质进行设计,并针对海岛高温、高湿、高盐雾的环境特点,优化设备选材与防腐设计。运行结果表明,产水水质符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求,电耗<3.5 kW·h/m³,运行时间不少于8 000 h/a,系统运行稳定可靠。该工程的实施为我国东南沿海类似海岛的海水淡化项目提供了技术参考与工程示范,具有显著的社会效益和经济效益。

关键词: 海水淡化; 海岛; 国产化能量回收; 双膜法; PLC控制

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)14-0079-08

Practice of Seawater Desalination and Domestic Energy Recovery Project on an Island in Zhoushan

Yang Shujun^{1,2,3}, Huang Haopeng⁴, Wang Chengpeng^{1,2,3}, Li Dongyang^{1,2,3},
Liu Hao^{1,2,3}, Yan Peng^{1,2,3}

(1. *The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR<Tianjin>, Tianjin 300192, China*; 2. *Key Laboratory of Seawater Desalination and Membrane Materials, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300192, China*; 3. *Weihai Industrial Technology Research Center of Seawater Multipurpose Utilization, Weihai 264201, China*; 4. *Tianjin Blue Cross Membrane Technology Co. Ltd., Tianjin 300192, China*)

Abstract: To address the persistent issue of freshwater resource shortages on an island in Zhoushan and to ensure a stable and reliable water supply for local residents, a seawater desalination project with a design capacity of 1 500 m³/d has been constructed. This project employs a dual-membrane treatment process consisting of dissolved air flotation, ultrafiltration, first-stage reverse osmosis, second-stage reverse osmosis, and post-mineralization, supplemented by a domestically developed turbine-type energy recovery system and a PLC-based automatic control system integrated with an

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(K-JBYWF-2024-T06); 天津市重点研发计划项目(25YFYYFG01650、24YFXTZH00340)

通信作者: 晏鹏 E-mail: 2906992511@qq.com

industrial computer. The engineering design was carefully based on the seawater quality of nearby waters and incorporated optimized equipment selection and effective anti-corrosion measures to address the high-temperature, high-humidity, and high-salt-mist conditions typical of the island environment. Operating results indicate that the produced water quality consistently meets the requirements of the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022), with a specific energy consumption of less than 3.5 kW·h/m³ and an annual operating time of no less than 8 000 hours, demonstrating stable and reliable system performance. The implementation of this project provides both valuable technical references and practical engineering demonstrations for similar seawater desalination projects on islands along China's southeastern coast, yielding notable social and economic benefits.

Keywords: seawater desalination; island; domestic energy recovery; double-membrane method; PLC control

浙江舟山某海岛受地理环境制约,淡水资源长期匮乏。该岛面积狭小,地形起伏明显,地表径流短促,难以形成稳定的淡水蓄积条件^[1]。全岛常住人口约 800 人,日常用水主要依赖坑道储存雨水及少量外运淡水。后续虽改造废弃储粮洞库扩容蓄水,在一定程度上缓解了用水压力,但长期储存导致出水水质不稳定,且这类水源受季节性降水影响显著,旱季出水量锐减,无法支撑岛上居民常态化、规模化用水需求。

近年来,该岛旅游业快速发展,游客数量持续攀升,夏季旅游高峰期日均接待量超 2 000 人次,用水需求刚性增长,进一步加剧了水资源供需矛盾,淡水供应紧张问题日益突出。目前,岛上尚未建成标准化水厂,现有淡水供给体系规模有限、处理工艺简陋,供水水质随季节波动较大,难以兼顾民生保障与旅游产业发展需求。部分区域在用水高峰时段出现水压不足、分时供水等情况,直接影响居民生活质量与旅游服务品质。随着旅游业的持续升级及常住人口对生活品质要求的提高,社会各界对该岛自来水供应的稳定性、安全性与可持续性提出了更高要求。为突破淡水资源瓶颈、优化供水结构,保障区域经济社会可持续发展,该岛经调研论证与统筹规划,决定建设规模为 1 500 m³/d 的海水淡化工程,构建水源保障体系。

1 原水水质与设计条件

1.1 原水及设计出水水质

原水取自东海海域,含盐量 30 000~31 000 mg/L,浊度 35~40 NTU。原水水质如表 1 所示。出水水质需满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)

要求。附近海域每年存在约 1 个月的赤潮期,其间海水水质突发恶化,藻类、悬浮物(SS)等污染物含量显著升高,对预处理系统提出了更高要求。赤潮期间,藻类暴发,对反渗透系统的稳定运行构成极大挑战,在我国东南沿海地区的项目中更为突出^[2]。

表 1 原水水质

项目	水温/ ℃	实用 盐度	pH	溶解氧 (DO)/ (mg/L)	COD/ (mg/L)	SS/ (mg/ L)	溶解无机 氮(DIN)/ (mg/L)	活性磷 酸盐/ (mg/L)
数值	24.9	25.2	7.91	7.53	1.75	6.7	0.696	0.025
项目	油类/ (mg/ L)	砷/ (μg/L)	铜/ (μg/L)	锌/ (μg/L)	铬/ (μg/L)	镉/ (μg/ L)	多氯联 苯/(ng/L)	
数值	0.016	0.71	2.98	9.84	1.03	0.87	<0.2	

1.2 设计条件

工程设计运行温度范围为 15~30 ℃,以适应海岛海域水温变化特征。针对海岛高温、高湿、高盐雾的特殊环境,所有设备选材及电气防护均按相应高标准进行设计^[3]。系统取水量 4 179 m³/d,废水总排放量 2 679 m³/d,其中一级反渗透浓水排放量 2 037 m³/d,经能量回收装置后利用海流混合与排放口扩散作用直接排海。公用工程方面,动力电源采用 380/220 V、50 Hz 三相四线制,控制仪表电源采用 220 V、50 Hz 单相制;车间配备空调采暖设施,保障室内温度在 5~45 ℃;设置独立空气压缩系统,为设备运行提供稳定气源。

2 工艺流程

采用“预处理+超滤+一级反渗透+二级反渗透+后矿化”的全流程处理工艺,具体见图 1。

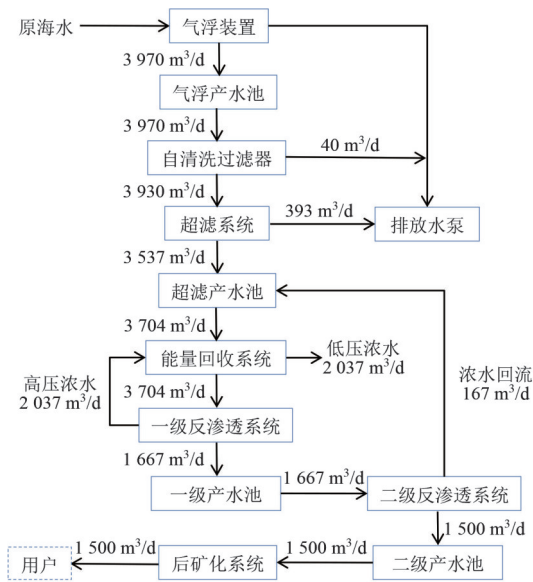


图1 海水淡化工艺流程

2.1 预处理阶段

海水经取水泵提升后进入气浮池,其中絮凝剂选型是关键环节。针对海岛海水高盐、高浊、偶发赤潮的特性,本工程对比了聚合氯化铝(PAC)和聚合氯化铁(PFC)两种絮凝剂。当海水盐度为30 000 mg/L、絮凝剂投加量为30 mg/L时,不同pH下PAC与PFC的絮凝效果对比见图2。

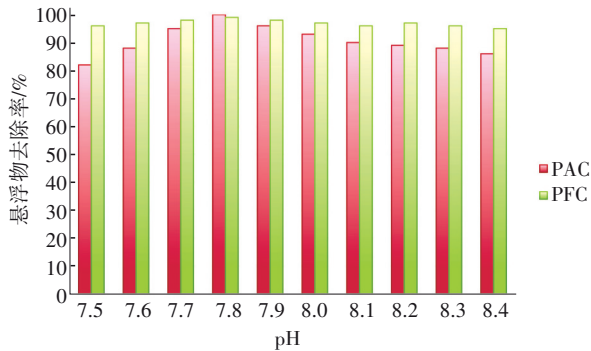


图2 不同pH下PAC与PFC的絮凝效果对比

试验研究结果表明,铁盐絮凝剂更具适配优势:其一,絮凝效能更稳定,在高盐环境下沉降速度较铝盐提升30%以上;其二,污染物去除性能更优,全试验pH区间内悬浮物去除率稳定维持在90%以上,同时对水体藻类去除效果优良,无铝盐残留带来的供水安全隐患;其三,pH适配范围更广,效果波动小于5%。因此,本工程选用PFC作为絮凝剂,投加量根据原水浊度自动调节,范围为20~50 mg/L。

温度是影响气浮效果的另一重要因素^[4]。针对

海岛海域水温15~30℃的季节变化特征,通过正交试验优化了不同温度下的气浮运行参数。试验采用L₉正交设计,各考察因素对应的梯度水平见表2。通过极差、方差对9组试验数据进行综合分析,得到不同水温区间适配的最优运行参数:低温15℃、中温22℃工况的最优溶气压力为0.42 MPa、回流比为21%;高温30℃工况的最优溶气压力为0.48 MPa、回流比为24%。

表2 正交试验

水平	因素A:温度/℃	因素B:溶气压力/MPa	因素C:回流比/%
1	15(低温)	0.35	18
2	22(中温)	0.42	21
3	30(高温)	0.48	24

优化后,气浮系统在全温度区间内对悬浮物的去除率均稳定在90%以上,浊度去除率达85%以上,为后续超滤系统提供了稳定的进水水质。气浮过程中同步投加杀生剂,以灭活微生物与藻类,配合铁盐絮凝剂的架桥凝聚作用,进一步提高了杂质去除效果。最终经气浮分离去除大部分泥沙、悬浮物、胶体及油类杂质,出水进入气浮产水池进行水力缓冲。

2.2 超滤阶段

气浮产水经超滤供水泵输送至自清洗过滤器,去除100 μm以上颗粒后进入超滤系统,进一步去除细菌及小分子悬浮物等杂质^[5]。出水进入超滤产水池,为反渗透系统提供合格进水^[6]。

2.3 反渗透脱盐阶段

超滤产水经5 μm保安过滤器去除细小杂质后,由自主研发的透平式能量回收一体机加压送入一级反渗透系统脱盐。一级反渗透浓水进入一体机内置的透平腔室,推动透平叶轮旋转产生机械动能,直接辅助驱动加压叶轮运转,实现高压能量的高效回收再利用^[7]。一级反渗透产水进入二级反渗透系统深度脱盐,进一步提升产水水质;二级反渗透浓水回流至超滤产水池循环利用,提高水资源回收率^[8]。

2.4 后矿化处理与供水阶段

二级反渗透产水经次氯酸钠消毒与pH调质后,进入后矿化系统,再通过恒压变频外供水泵输送至用户管网,以保障供水压力稳定。

后矿化处理可以提升饮用水品质^[9]。本工程采

用食品级碳酸钙与氧化镁复合滤料过滤工艺,通过控制滤料填充量与水流速度,实现对产水水质的优化调节^[10]。矿化前后水质变化显著:矿化前,二级反渗透产水硬度极低、pH偏酸性、口感干涩,长期饮用可能影响人体骨骼健康与酸碱平衡;矿化后,产水硬度提升,钙离子含量可达20~40 mg/L,符合GB 5749—2022中矿物质含量要求,同时pH调节至7.0~8.0的弱碱性范围,改善了饮用水口感,提升了适口性。此外,矿化过程中滤料溶解产生的碳酸根离子可与水中微量重金属离子结合形成沉淀,进一步提升水质安全性。经检测,矿化后水中铅、镉等重金属离子含量均低于0.001 mg/L,有效保障了居民饮水安全。

系统废水主要包括气浮废水、超滤反洗水、自清洗过滤器废水及一级反渗透浓水,其中前3种废水经收集后,与一级反渗透浓水混合,利用海流扩散作用排海,避免对近岸海域环境造成不利影响。

3 主要构筑物及设备参数

3.1 预处理系统

预处理系统的核心为气浮装置与气浮产水池。气浮装置设2套,单套处理水量100 m³/h,本体采用碳钢防腐,过流件选用耐海水腐蚀材质。配套溶气系统、回流系统、铁盐絮凝剂投加装置(投加量可根据原水浊度自动调节,范围为20~50 mg/L)、刮渣机及电控系统,可高效去除原水中的悬浮物与藻类。气浮产水池设1座,钢筋混凝土结构,容积200 m³,配备液位计,用于缓冲气浮出水,稳定后续供水压力。

3.2 超滤系统

超滤系统包含超滤供水泵、自清洗过滤器、超滤膜组、超滤反洗泵及超滤产水池等核心设备,各设备参数适配工程处理规模与海岛运行环境要求。超滤供水泵选用2台双相钢2205材质设备,单台处理水量88 m³/h、扬程30 m,采用变频控制保障供水稳定;配套2台进口自清洗过滤器,滤网材质不低于双相钢2205,单台处理水量88 m³/h,过滤精度100 μm,当压差达到0.05 MPa时可自动清洗,有效拦截大颗粒杂质;超滤膜组设置2套外压式聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜设备,单套净出力73.7 m³/h,回收率不低于90%,每套含40支膜元件,单支有效膜面积50 m²;配置1台超滤反洗泵,处理水量160 m³/h、

扬程30 m,采用变频控制实现高效反洗;超滤产水池设1座,钢筋混凝土结构,容积200 m³,配备液位计,实现水力缓冲与液位监控。

3.3 反渗透系统

反渗透系统是工程的核心脱盐单元,包含一级与二级反渗透系统、清洗系统、冲洗系统及产水池等关键设备。其中,一级反渗透系统配套采用自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所自主研发的透平式能量回收一体化高压泵,实现动力供给与能量回收的协同优化,是系统高效节能的核心保障,同时显著提升了工程核心设备的国产化率与技术先进性。各核心设备及集成应用细节如下。

① 核心动力单元

一级反渗透系统的核心动力与能量回收功能由2台透平式能量回收一体机集成实现,无需额外配置独立高压泵。单台一体机额定处理水量83 m³/h,可将超滤产水加压后送入一级反渗透膜堆,同步回收一级反渗透浓水的高压势能,实现动力输出与能量回收的协同运行,大幅简化系统结构。二级反渗透高压泵配置2台不锈钢316L材质设备,单台处理水量37 m³/h、扬程130 m,采用变频控制,以保障供水压力稳定。

② 能量回收一体机

本工程采用的2台透平式能量回收一体机,由自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所自主研发,拥有独立知识产权,可实现高压供水与浓水能量回收的一体化运行,有效填补了国产设备在海岛高盐雾、变工况海水淡化领域的应用空白^[11]。该机型针对性地适配海岛恶劣工况,主体采用双相钢2205材质,关键过流部件选用哈氏合金C276,具备优异的耐高盐雾、高盐度腐蚀性能^[12];同时采用无密封设计,可有效规避高压高盐环境下的磨损泄漏问题,延长设备使用寿命,且运维成本较进口分体式系统降低60%以上。

该能量回收装置核心采用同轴式透平-泵一体化结构设计,透平叶轮与增压泵叶轮通过刚性合金轴直连,无中间传动部件,整体封装于同一壳体内。其核心组件包括透平端、泵端及中心轴(见图3)。装置工作时依托透平机与增压泵的协同耦合运行机制,在高、低压流体介质间实现能量高效传递,且两端压力与流量参数相互独立、无直接耦合关系(见图4),进一步提升了能量回收整体效率,其能量

转换效率可达85%~90%。

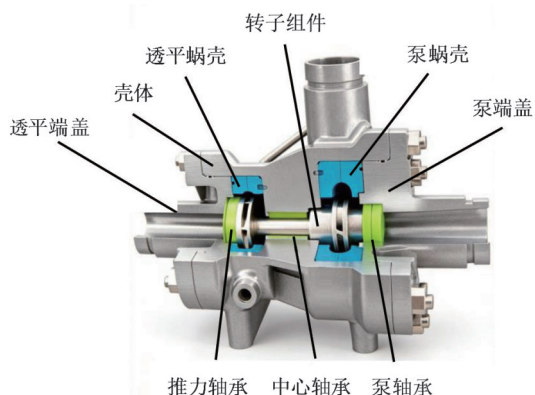


图3 透平式能量回收装置内部结构示意图

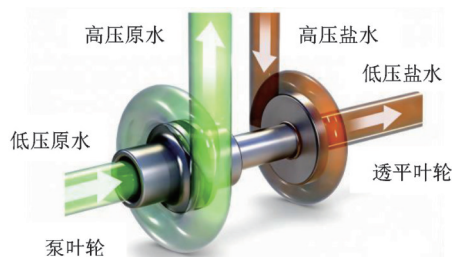


图4 透平式能量回收装置流体流向及工作原理示意图

该装置在工程中的流程设计见图5。其具体工作原理如下:经高压泵加压后的原海水进入反渗透膜组件,部分透过膜形成淡水,剩余部分则成为高压浓盐水。在传统无能量回收系统中,该高压浓盐水需经泄压后排放;而本系统中,高压浓盐水经入口喷嘴进入透平段,冲击透平叶轮旋转,通过同轴结构同步驱动泵端叶轮转动。在此过程中,高压浓盐水所携带的能量完成“压力能→轴功→压力能”的转化,最终传递给由泵入口引入的低压原海水。减压后的浓盐水自透平出口以常压状态排出,增压后的海水则经泵端高压出口输出,重新进入膜组件参与反渗过程。透平机安装于高压泵出口侧并串联运行,通过增压作用提升原海水压力,可显著降低高压泵所需扬程,减少电机动力消耗。

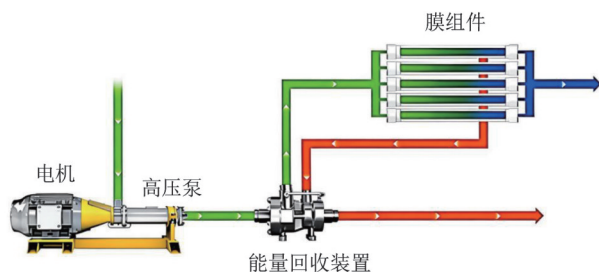


图5 透平式能量回收装置流程设计示意图

工程现场如图6所示。



图6 反渗透撬块与能量回收一体机工程现场

在本项目中,两台透平式能量回收一体机投入实际运行,该机型运行范围为进水流量70~90 m³/h、浓水压力5.0~6.5 MPa,可适配海岛变工况运行需求,平均无故障运行时间超过8 000 h/a。

③ 反渗透膜系统

一级反渗透膜采用8040型海水抗污染复合膜,共156支,分2套配置,采用一段式排列,脱盐率不低于99%;二级反渗透膜为8040型节能超低压复合膜,共72支,分2套配置,以一段膜壳数量:二段膜壳数量=4:2的形式排列,脱盐率不低于97%,以保障深度脱盐效果。

④ 辅助系统

产水池包含1座100 m³和1座200 m³钢筋混凝土结构水池,分别作为一级、二级反渗透产水池,均配备液位计实现液位监控;配套1套超滤与反渗透共用的化学清洗系统,包含10 m³聚乙烯(PE)材质清洗水箱、140 m³/h清洗保安过滤器及3台清洗泵,用于膜系统的定期清洗维护;设置1台一级反渗透冲洗泵,处理水量115 m³/h、扬程30 m,采用一级反渗透产水进行停机冲洗,以防止膜结垢与损坏。

3.4 外供水与加药系统

系统采用可编程逻辑控制器(PLC)+工控机的控制方式,具备手动与自动两种操作模式。自动模式下,通过发光二极管(LED)可视化面板实现工艺参数采集、处理与记录,并具备异常工况报警与自动打印功能;手动模式下,可通过现场控制箱实现设备启停操作。电气控制柜满足《电气装置安装工程 盘、柜及二次回路接线施工及验收规范》(GB

50171—2012)相关要求,并具备防盐雾腐蚀和防凝露功能,室内设备防护等级不低于IP54,室外设备不低于IP55。系统配备完善的监测仪表,包括压力表、压力变送器、电磁流量计、电导率表及氧化还原电位(ORP)表等,仪表过流部件采用哈氏合金等耐海水腐蚀材质,以适应海岛环境要求。

3.5 后矿化系统

后矿化系统是提升饮用水品质的关键单元,采用固定床过滤工艺,核心设备为2套并联运行的矿化滤罐,单套处理水量为75 m³/h,以保障系统1 500 m³/d的总产水规模需求。滤罐主体采用304不锈钢材质,内衬采用食品级防腐涂层,从而有效避免材质对饮用水的二次污染。单罐直径1.6 m、高度4.5 m,设计承压0.6 MPa,适配后续供水系统的压力要求。选用食品级碳酸钙与氧化镁复合滤料,按质量比3:1混合填充,填充高度1.2 m,滤料粒径范围0.5~2.0 mm。在水流速度为1.5 m/h的设计工况下,既能实现矿物质的有效溶出,又能避免滤料流失或板结。系统配套设置滤料装填口与排污口,便于滤料的更换与日常维护。此外,系统配备在线pH计与硬度监测仪表,实时监测矿化出水水质,并将监测数据接入PLC系统。当水质指标偏离设定范围时,系统可自动调节水流速度,以保障矿化效果稳定。

3.6 电气与控制系统

本工程电气与控制系统采用PLC+工控机的分布式控制架构,实现了全工艺流程的自动化监测、控制与保护,全面提升了设备的可靠性与运维便利性^[13]。在电气系统方面,动力电源采用380/220 V、50 Hz三相四线制,配置2台1 250 kV·A干式变压器(1用1备),以保障系统供电稳定性。所有电气设备均按海岛高盐雾、高湿度环境要求进行选型,配电柜采用304不锈钢材质,具备IP54防护等级,内部配

备除湿及防凝露装置,能够有效抵御盐雾腐蚀影响。

控制系统核心采用西门子S7-1500系列PLC,配套15英寸(1英寸=2.54 cm)工业触摸屏,实现工艺参数的实时采集、显示与控制。系统可自动监测原水浊度、温度、盐度,以及各单元进出口压力、流量、水质等关键参数,共计接入监测点68个;具备自动控制功能,可根据原水水质波动自动调节絮凝剂投加量、气浮溶气压力及回流比,根据产水需求调节高压泵频率与外供水泵转速,实现系统工况的自适应优化;同时配备完善的报警与保护机制,当出现设备故障、水质超标、液位异常等情况时,立即发出声光报警并记录故障信息,关键设备可自动切换至备用状态或停机保护,从而保障系统安全稳定运行。

此外,系统预留远程监控接口,可通过工业以太网实现与海岛水务管理中心的数据互通。管理人员可实时查看系统运行状态、历史数据与报警记录,并远程下发控制指令,大幅提升运维管理效率^[14]。控制系统还具备数据统计与报表生成功能,可自动记录每日产水量、能耗及药剂消耗量等关键数据,生成日报与月报,为工程运营管理提供数据支撑。

4 运行效果

本工程按设计参数调试后,实际运行效果稳定。系统产水水质全面符合GB 5749—2022要求,微生物指标(包括菌落总数、总大肠菌群及耐热大肠菌群)均未检出,系统脱盐率稳定达到98%以上。后矿化处理对水质优化效果显著,将二级反渗透产水由弱酸性调节至适宜饮用范围,硬度(以CaCO₃计)达到50~100 mg/L,口感温润适宜,完全满足海岛居民生活饮用水需求。

出水水质见表3。

表3 出水水质

项目	pH	氯化物/ (mg/L)	硫酸盐/ (mg/L)	钙/(mg/L)	钠/ (mg/L)	氟化物/ (mg/L)	硝酸盐/ (mg/L)	硼/ (mg/L)	微生物/ (CFU/mL)	电导率/ (μS/cm)
一级反渗透产水	6.4~6.6	100~110	<2.0	<0.6	<100	<0.1	<0.1	<1.0	<50	<400
二级反渗透产水	6.3~6.5	7.0~9.0	<0.1	<0.05	<2	<0.01	<0.01	<0.7	未检出	<20
后矿化出水	7.0~8.0	7.0~9.0	<0.1	20~40	<2	<0.01	<0.01	<0.7	未检出	100~200

系统总产水量1 500 m³/d,按24 h连续运行设计,各单元处理效率稳定:超滤系统回收率90%,一级反渗透回收率45%,二级反渗透回收率90%;运行

时间不少于8 000 h/a,可满足全年连续供水需求。在赤潮期海水水质恶化阶段,预处理系统通过强化杀生剂投加与气浮分离,可有效去除藻类及悬浮

物,保障后续膜系统进水水质稳定,未出现膜污堵导致的产水量骤降问题。

系统总装机功率 520 kW,运行功率 366.6 kW,电耗 $<3.5\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,低于传统反渗透海水淡化工程平均能耗水平。这一节能成效的取得,核心得益于自主研发的透平式能量回收系统的高效节能作用。经测算,单套透平式能量回收装置每小时可回收能量约 $45\text{ kW}\cdot\text{h}$,两套装置全天可回收能量 $2\,160\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。按年运行 $8\,000\text{ h}$ 计,年可节约电能 72 万

$\text{kW}\cdot\text{h}$,显著降低了工程运行成本。此外,工程对水泵等转动设备采取了降噪措施,设备最大噪声小于 85 dB ,符合《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348—2008)要求。

5 效益分析

本工程总投资 1 490 万元,核心依托透平式能量回收系统实现节能降本,同时在供水保障与生态保护方面亦发挥了重要作用。将工程运行成本等与传统供水模式进行对比,具体见表 4。

表 4 工程运行成本、节能效益及供水保障与无能量回收模式的综合对比结果

项目	指标	本工程数值	无能量回收模式参考值	本工程效益
运行成本	电费成本/(元/ m^3)	6.3	≥ 10.4	依托能量回收,电费成本降低约 40%
	总运行成本/(元/ m^3)	10.5	14.1~14.9 (均值 14.5)	因电费降低,总成本均值降低 28%
节能效益	电耗/($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$)	3.5	≥ 5.8	能量回收实现年节约电能 72 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$
	年节约电费/万元	129.6	—	能量回收直接贡献,按海岛电价 $1.8\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 、年运行 $8\,000\text{ h}$ 核算
供水保障	年稳定运行时长/h	$\geq 8\,000$	$\geq 7\,500$	运行稳定性更优,与能量回收无直接关联
	水质达标情况	符合 GB 5749—2022 要求		水质稳定性显著提升,与能量回收无直接关联

本工程运行成本包含药剂及耗材费、膜更换费等固定成本与可变电费两部分,其中固定成本与传统工艺持平。能量回收系统的核心作用是降低电费开支,而电费是本工程运行成本的主要组成部分,占总运行成本的 60% 左右。经核算,依托透平式能量回收系统,本工程电耗可控制在 $3.5\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 以内,按海岛电价 $1.8\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计算,电费成本为 $6.3\text{ 元}/\text{m}^3$;传统无能量回收工艺电耗 $\geq 5.8\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,电费成本 $\geq 10.4\text{ 元}/\text{m}^3$,本工程的电费成本降低约 40%。电费下降直接推动总运行成本降至 $10.5\text{ 元}/\text{m}^3$,较传统工艺均值降低 28%。按年设计供水量 54.75 万 m^3 、年运行 $8\,000\text{ h}$ 测算,仅能量回收系统即可实现年节约电费 129.6 万元[年节约电能 72 万 $\text{kW}\cdot\text{h}\times 1.8\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$],节能降本效益显著,充分体现了国产化能量回收技术的工程应用价值。此外,本工程在年稳定运行时长、水质达标率方面均优于传统工艺,运行可靠性与水质稳定性更具优势。

在社会效益方面,本工程实现了 $1\,500\text{ m}^3/\text{d}$ 规模的连续稳定供水,解决了该岛淡水资源短缺问题,既保障了全岛常住人口 800 人的日常用水安全,也满足了夏季旅游高峰期超 2 000 人次的刚性用水需求,彻底消除了水压不足、分时供水等困扰,有效提升了居民生活质量与旅游服务品质,为海岛旅游

产业持续升级提供了核心水资源支撑,推动了海岛经济社会多元化发展。

在环境效益方面,本工程采用封闭化处理工艺,一级反渗透浓水经能量回收后,与气浮废水、超滤反洗水等混合,通过扩散式排海口达标排海,对近岸海域水环境影响极小。相较于传统地下水开采模式,本工程从根本上避免了过度采水引发的地面沉降、海水入侵等生态问题。同时,气浮预处理与超滤的组合工艺减少了化学药剂投加量,全程采用自动化精准投加,进一步降低了药剂对水体的影响,践行了绿色环保的工程设计理念,实现了环境效益与经济效益的协同发展。

6 结语

舟山某岛规模 $1\,500\text{ m}^3/\text{d}$ 的海水淡化工程采用“气浮+超滤+一级反渗透+二级反渗透+后矿化”工艺,配套自主研发的透平式能量回收系统与 PLC 智能控制系统,针对海岛特殊环境优化了设备选材与防腐设计,工程设计合理、运行稳定。

实际运行结果表明,系统产水水质达标,电耗节能成效主要依托自主研发透平式能量回收装置的高效能量转换能力。该装置的成功应用不仅降低了工程运行成本,而且打破了国外同类设备在海岛海水淡化领域的垄断,体现了国产核心设备的技

术优势。工程年运行时间长,抗冲击负荷能力强,能够适应赤潮期水质恶化的特殊工况。本工程既解决了该岛的缺水问题,又显著降低了供水成本。其技术方案,尤其是自主研发的透平式能量回收装置的应用经验,可为我国东南沿海类似海岛的海水淡化项目提供重要参考,具有广泛的推广应用价值。未来可进一步优化药剂投加方案与膜清洗周期,并结合海岛丰富的风能、太阳能等可再生能源供电,进一步降低运行成本,提升工程的节能性与可持续性。

参考文献:

- [1] 赵珍. 高质量发展下舟山海洋资源环境承载力评价与提升[J]. 浙江海洋大学学报(人文科学版), 2022, 39(6): 29-38.
- [2] 马灵飞. 水处理单元对藻类有机物氯化生成消毒副产物的防控机制[D]. 长沙:中南大学, 2022: 3-6.
- [3] 刘云奎. 海岛工程条件下海水淡化工艺流程论证及主体设计[J]. 给水排水, 2025, 51(7): 75-81.
- [4] 李洪清, 田宝义, 赵新娟, 等. 针对北方某大型水库原水的预处理工艺研究[J]. 中国给水排水, 2025, 41(19): 74-79.
- [5] 张瑞君, 冯晓琳, 肖峰, 等. 天津市某净水厂超滤膜维护性化学清洗方案优化[J]. 中国给水排水, 2025, 41(19): 8-15.
- [6] 方刚, 李会慧. 海水淡化技术在海岛供水中的应用经验[J]. 中国给水排水, 2025, 41(10): 79-85.
- [7] 翁晓丹, 张希建, 张建中, 等. 我国反渗透海水淡化能量回收装置研究与应用现状[J]. 中国给水排水, 2021, 37(4): 11-15.
- [8] 苏慧超, 邵天宝, 薛喜东, 等. 海水淡化反渗透系统设计方式技术经济性对比[J]. 净水技术, 2025, 44(11): 126-132, 147.
- [9] 陈景光, 陆彬, 卢彪, 等. 海水淡化水经矿化调质后引入市政供水系统工程实例[J]. 中国给水排水, 2025, 41(10): 79-85.
- [10] 郎华伟, 刘艳辉, 杨舒畅, 等. 海水淡化水进入市政管网现状分析[J]. 盐科学与化工, 2025, 54(11): 29-33.
- [11] 汪程鹏, 王生辉, 肖业祥, 等. 海水淡化能量回收装置能耗分析与设计比选[J]. 水处理技术, 2023, 49(12): 51-54.
- [12] 朱榕鑫, 乔晓娟, 王玮琦, 等. 膜法海水淡化工程中主要管材性能比较及选用建议[J]. 广东化工, 2025, 52(12): 63-68.
- [13] 何嘉莉, 袁耀芬, 周沛良, 等. 自来水厂混凝剂自动精准投加系统建设与运行[J]. 中国给水排水, 2025, 37(18): 139-143.
- [14] 冯涛, 俞永江, 尹立辉, 等. 基于NB-IoT的海岛海水淡化远程监控系统[J]. 测控技术, 2021, 40(9): 90-95.

作者简介:杨树军(1985—),男,天津人,博士,工程师,主要从事海水淡化技术研发与应用工作。

E-mail: yangshu_32@tju.edu.cn

收稿日期: 2026-01-28

修回日期: 2026-03-16

(编辑:沈靖怡)

综合运用自然恢复和人工修复,
持之以恒推进生态建设